

変形立体磁気軸をもったトーラスピンチプラズマの実験的研究

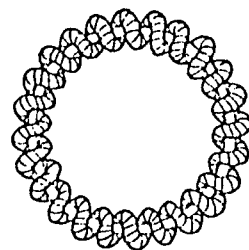
著者	池田 長康
号	606
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/11555

氏 名	いけ だ なが やす 池 田 長 康
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 57 年 3 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 37 年 3 月 東京工業大学大学院理工学研究科 原子核工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	変形立体磁気軸をもったトーラスピンチプラズマの 実験的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 長尾 重夫 東北大学教授 梶山 一典 東北大学教授 平川 直弘 東北大学助教授 渡辺 博茂

論 文 内 容 要 旨

エネルギー問題の最終的解決策として、核融合によるエネルギーの生産は不可決であり、この目標に向って、トカマクをはじめとして、各種の実験装置がつくられて来ている。経済性のある炉を建設するには、種々の装置パラメータが検討されねばならない。この中でも β 値はプラズマのエネルギー損失や磁場のエネルギー量に大きな影響を与え、少くとも 10 % 以上必要であると考えられている。この点から見れば、現在最も良いデータを出しているトカマク装置も理論的には限界があり、高ベータプラズマの閉じ込めには別の方法を探し出さなければならない。

立体磁気軸系磁場配位をもつプラズマの閉じ込めは、第 1 図に一例を示すように、平面トーラスにソレノイドを巻きつけたヘリカルトーラスであり、この巻きつけ方により種々の形式に分類される。シャフラーノフや長尾らの理論から、この系は充分大きな磁気井戸をもち高シャーであり、ヘリックスの周期 n を充分大きくとれば($n > 16$)、 β 値の制限はなくなり、高ベータプラズマ



$$m=1, n=24$$

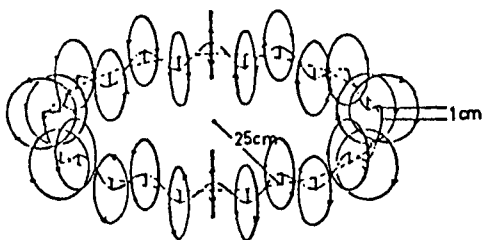
第 1 図 立体軸トーラス

の閉じ込めには非常に適していることが確かめられている。この系の平衡位置は磁気軸の曲率に関する微小量について摂動法を用い、プラズマ柱と理想導体壁との相対変位

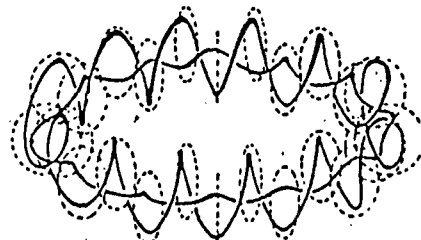
$$\xi_{\ell} = -\frac{3}{8} k_{\ell} (b_w^2 - a_p^2) + \frac{k_{\ell}}{2\kappa_{\ell}^2} \left(1 - \frac{a_p^2}{b_w^2}\right) \beta \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 k_{ℓ} 、 κ_{ℓ} は磁気軸の曲率と捩率のフーリエの ℓ 成分であり、 a_p 、 b_w はそれぞれプラズマ柱半径と導体壁半径である。 β は磁気圧に対するプラズマガス圧の比である。このように、理論的には種々検討されて来ているが実験的な研究は非常に少ない。本研究の目的は、この立体磁気軸系磁場閉じ込め平衡理論を実験的に検証することである。ヘリカル磁気軸に直交し同一のトロイダルコイルをヘリカルに配置した通常の立体磁気軸系コイルと異なり、平衡条件を見出すことが容易なように、磁気軸の曲率と捩率を可変にする二つのコイル系の合成系を用いた。このコイル系を変形立体磁気軸系と呼ぶことにする。

波形トロイダルコイル（または θ コイル）は、トロイダル面から上下に 1 cm 交互に位置をずらせ磁気軸を上下に変位させる。このコイルに沿わせた波形ヘリカル $\ell = 1$ コイルは、磁気軸を前後に変位させる。更に、この両コイル系の位相を 90° ずらすことにより、ヘリカル磁気軸を形成する。これら両コイル系の模式図を、第 2 図(a)および(b)に示す。



(a) 波形シートコイル系



(b) 波形ヘリカル $\ell = 1$ コイル系

第 2 図 変形立体磁気軸コイル系

従来のプラズマ実験では、プラズマ生成が不充分であったり、閉じ込め磁場に外乱が入ったりして結果を理論と対比するのが困難な場合がしばしば見られた。それ故実験に先立ち、磁場波形の制御とプラズマの生成および予備加熱を検討した。

また、この装置により詳細な磁場の性質を知るため、先ず解析的に、この実験装置と等しい周期をもつ波形コイル系とヘリカル $\ell = 1$ コイル系を重ね合せた複合コイル系の直線磁場配位の特性を調べた。次に、ビオ・サバールの法則を直接適用することにより、このコイル系の忠実な磁場の数

値解析を行った。

アナコンによる波形解析と予備実験の結果、閉じ込め磁場用電源としてはパルス形成 (PFN) 回路を採用し、方形波電流を用いて通常のクローバによる電流のリップルと電流値の減少を除去した。またプラズマの生成準備には、このピンチプラズマ実験的適合した予備加熱プラズマを得るためにプラズマ生成・準備段階とこれに続く主放電プラズマへの初期条件整備段階に分けて調べた。前者の段階については、装置パラメータと

関連した放電開始の諸条件を詳細に調べ、トロイダル放電管における放電開始から生長に至る機構を明らかにした。後者の段階では、予備放電電流の残留磁場を、この電流の遮断により $1\mu\text{sec}$ の間に 10～20% まで減少させ、主放電への悪影響を排除した。

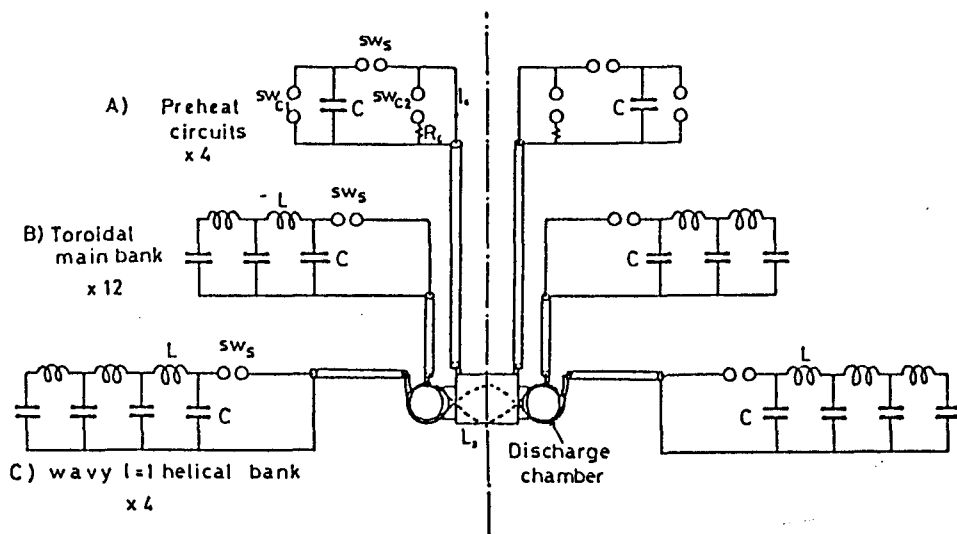
以上のような検討の後、実験を行った。この実験装置の幾何学的パラメータおよび電気のパラメータを第 1 表に示す。第 3 図には PFN 回路を用いた実験回路の概略を示す。

まず、平衡位置を確認するため、プラズマ位置の時間的推移を流しカメラによって観測した。この磁場配位で閉じ込められるプラズマは生成条件から二つの場合がある。一つは通常のシートピンチと同じ場合でトロイダル磁場が強く、ヘリカル $\ell = 1$ 磁場が弱い (S モード)。もう一つはトロイダル磁場に比べ、ヘリカル $\ell = 1$ 磁場が強い場合 (L モード) はトロイダル磁場を下

げているため、プラズマの温度は低く顕著な動きは見られない。従って、平衡の確認は S モードプラズマで行った。プラズマは $\ell = 1$ コイル電流 4.5～5.5 kA では放電管中心より 13～14 mm の位置に安定にとどまる。この範囲外では平衡状態を取り得ない。プラズマ位置のガス圧依存性は、初期ガス圧 30 mTorr 以上では安定である。プラズマは、6～7 μsec で最大変位～16 mm をとり、平衡点の周りに初期振幅 1.2 mm、周期 3.5 μsec の減衰振動を行い、平衡を保持する。この時プラズマ断面は、やや縦長の楕円で、ヘリカル $\ell = 1$ 電流が大きくなるにつれて、断面は小さくなる。数値解析によって存在が明らかとなった磁場のシャーや磁気井戸を、磁場各成分の詳細な測定により確認した。一例として、磁力線の方

第 1 表 実験装置パラメータ

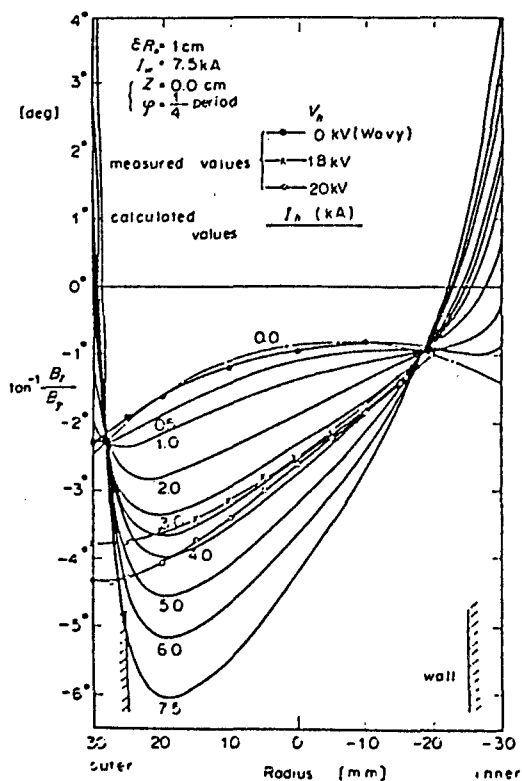
装置パラメータ	
放電管	単純トーラス形状 (石英)
大半径	250 mm
小半径	25 mm
θ コイル数	48
ヘリックス周期数	24
最適磁気軸ふれ	7.5 mm
電気パラメータ	
1) 波形トロイダルコイル電源	
電源エネルギー	36 kJ (84 kJ)
電源電圧	30 kV
静電容量	79 μF (185 μF)
並列回路数	12
PFN 段数	3 (7)
電 流	600 kA
電流立ち上り	2 μsec
電流パルス巾	8.5 μsec (24 μsec)
2) 波形ヘリカル $\ell = 1$ コイル電源	
電源エネルギー	16 kJ (44 kJ)
電源電圧	30 kV
静電容量	35.2 μF (96.8 μF)
並列回路数	16
PFN 段数	4 (11)
電 流	35.8 kA
電流立ち上り	2 μsec



第 3 図 実 験 回 路

向の半径方向分布を第 4 図に示す。計算値と測定値は良く一致している。平衡位置の確認に関連して、磁気軸位置の決定は重要である。この実験では $B\rho$ の測定から、 $B\rho = 0$ の位置が磁気軸位置であることが明らかとなった。理論的変位と比較するのに必要な β 値は、磁気測定から 15% 程度であることが判った。プラズマの温度についても、イオン温度が 20 ~ 30 eV, 電子温度が 10 ~ 20 eV であることが推測される。

この磁場配位でのプラズマの平衡は、第 5 図にまとめて示すように、理論値、最大 β 値の位置、流し写真による位置、測定磁場を用いたヘリカル座標での軸の位置、 $B\rho = 0$ の位置、がすべて放電管の中心から 15 mm 付近にあり、しかも推定した β 値とも矛盾しないことが判った。これらの位置は、すべて実験誤差内で一致した。



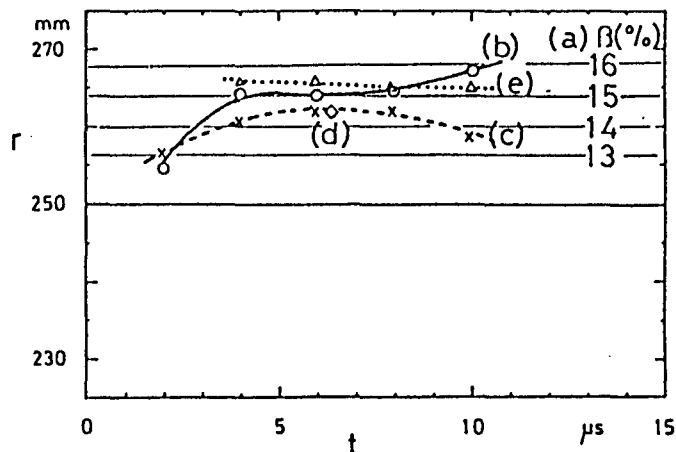
第 4 図 磁力線角度分布

以上プラズマを安定に閉じ込められることを確かめたのでより長い 24 μsec の閉じ込め磁場での実験を行った。しかしこの場合も顕著な不安定性は見られず、平衡点付近に安定に閉じ込められていることを確認した。

更に、今後長時間、より高温のプラズマをこの磁場配位に閉じ込めるために、この実験のプラズマの物理的特性を調べた。このプラズマは非衝突性の磁化プラズマの性質をもつが、衝突周波数から

は、まだ電磁流体力学的扱いが必要である。またMHD的な範囲では、拡散は磁気軸のヘリカル周期数が大きいので、ほぼ古典拡散となるということがわかり、プラズマの物理像を明確にした。

立体磁気軸系トーラスの研究は、まだ初期の段階であるが、プラズマの極めて有望な閉じ込め方法であり、本研究はこの分野に明るいデータを提供し得たと確認している。



- | | |
|------------------|-------------------------------------------------|
| (a) 理論値 | (d) $B_\theta = \alpha \rho B_t - B_\omega = 0$ |
| (b) 最大 β 値 | (e) $B_\rho = 0$ |
| (c) 流し写真 | |

図 5 平衡位置

審 査 結 果 の 要 旨

現在プラズマの生成、閉じ込めに関し、最もすぐれた成果を挙げているのはトカマク型装置である。しかしそのベータ値から予想される核融合炉としての出力密度は、ただか高速増殖炉の $1/50$ 程度であると考えられている。従って将来の核融合炉が経済的に成立つためには、プラズマベータ値を現在のトカマクの値の数倍まで増加させることが必要であり、今後の研究課題として最も重要なものの一つである。本論文は著者がシートピンチ放電によって得られたプラズマを、らせんパラメータ可変の変型立体磁気軸トラスに閉じ込め、その平衡と安定性について行った実験的研究の成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の目的、意義背景のほか、立体磁気軸トラスの一般的特長について述べている。

第2章では実験に用いた電源、プラズマ予備加熱法などについて述べている。特に予備加熱に用いたシートピンチの電流を、減衰振動の途中で遮断する方法は、安定な主放電を行うために極めて有効であり、興味ある手法といえよう。

第3章は変型立体磁気軸配位に関するもので、上下に変位した波型トロイダルコイル磁界と、 $\ell = 1$ らせんコイル磁界との合成磁界によって作られる磁気面、磁力線のシャープ、磁気圧などを計算し、その特性を明らかにしている。

第4章では実験装置とそれによって作られるプラズマの測定法との関連を考慮した装置パラメータの決定法を明らかにし、そのために考案したらせんコイル、磁界電源について述べている。

第5章では実験の結果を詳細に検討し、それがプラズマの平衡理論によってよく説明できることを示している。すなわちプラズマ柱の振動から求められるプラズマのベータ値は約15%であり、平衡位置の放電管軸からのずれは理論値とよい一致を示している。これは変型立体磁気軸配位においても通常の配位と同様に大きなベータ値をもつプラズマの閉じ込めを期待できることを明らかにしたものである。

第6章は実験で得られたプラズマの総合的な特性、振舞いについて述べたもので、プラズマの著しい不安定性や損失のないことを確かめている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は変型立体磁気軸トラスにおいて、シートピンチプラズマが安定に保持されることを実験的に明らかにしたものであり、これらに関する多くの有益な知見を得ており、核融合プラズマ工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。